Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 12, No. 4, 2022, p. 467-480

Design and Construction of a Cabinet Dryer for Food Waste and Evaluation of its Kinetics and Energy Consumption

A. Khaloahmadi[1], O. R. Roustapour[2*], A. M. Borghaee[3]

1- Department of Biosystems Engineering, Islamic Azad University, Branch of Eghlid, Iran
2- Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
3- Department of Biosystems Engineering, Science and Research Branch, Eslamic Azad University, Tehran, Iran
(*- Corresponding Author Email: o.roostapour@areo.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2021.69918.1037

Received: 09-05-2021 Revised: 05-08-2021 Accepted: 08-08-2021 Available Online: 10-08-2021	**How to cite this article:** Khaloahmadi, A., Roustapour, O. R., & Borghaee, A. M. (2022). Design and Construction of a Cabinet Dryer for Food Waste and Evaluation of its Kinetics and Energy Consumption. *Journal of Agricultural Machinery*, *12*(4), 467-480. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2021.69918.1037

Introduction

Providing new solutions to control wet waste is one of the most important issues in maintaining public health. Drying will reduce the harmful effects on the environment by reducing moisture and the smell of wastes as well as easy transportation and disposal costs. The purpose of the design and development of the household dryer is to dry food waste in order to reduce its volume and prevent the spread of its pollution in the air, water, and soil. To study the drying behavior of food waste, an experimental cabinet dryer was designed, fabricated, and evaluated for drying food waste.

Materials and Methods

The dryer consisted mainly of the drying chamber, electric heater, fan, air inlet channel, mesh tray, air distribution plates, temperature sensor, and control panel. Different parts of the dryer were made of a stainless galvanized sheet. The dryer was modeled using Catia 2019 software and its various parts were designed. The heating power was calculated as 2.7 kW. A centrifugal fan with an air volume of 310 m^3h^{-1}, 2800 rpm, and 110 Pa was used to supply airflow in the dryer. In the drying process, a tray with medium and lateral air passage was fabricated and applied. Food waste was obtained from fruit and vegetable waste, homemade food, and fruit shops. And nonfood items such as glass, paper, plastics, and metals were separated from the waste and crushed with a shredder, and reduced to sizes less than 20 mm. First, the product was placed in the environment for one hour and then pressed with a mechanical press with the same pressure to eliminate part of the water. An anemometer UT363 model made in China was used to measure the air velocity. The temperature was measured and controlled by a temperature thermostat of G-sense model made in Iran. The effect of three temperatures of 50, 60, and 70 $^{\circ}$C and three inlet velocities of 1, 1.5, and 2 m s^{-1} on the kinetics and intensity of drying of food waste and energy consumption of food waste with a thickness of 3 cm was investigated. Moisture ratio and drying intensity diagrams were extracted. Diffusion, activation energy, and energy consumption were determined.

Results and Discussion

Drying kinetics diagrams showed that temperature had a significant effect on moisture variation of food waste during drying. Drying period decreased with increasing temperature. The slope of the drying intensity diagrams increased with the increase of the dryer temperature. Drying rate was decreased at the temperature of 70 °c and it had a steeper slope that indicates the more intensity of the drying process in this condition. The drying process of all three samples occurred in the falling rate stage. The air duct on the side and in the middle of the tray caused hot air conducted above the tray and increased energy consumption. Effective moisture diffusivity of food waste during the drying process was in the range of 3.65×10^{-9}-4.56×10^{-9} (m^2 s^{-1}). The effective moisture diffusivity at temperatures of 50 $^{\circ}$C and 60 $^{\circ}$C was less than 70 $^{\circ}$C. Because at the temperature of 70 $^{\circ}$C, the membrane resistance of the cell destroyed by high heat and increased the diffusion coefficient in the material.

Conclusion

Increasing temperature caused the drying period decreased and the drying occurred in the falling rate stage. Temperature and the interaction of velocity and temperature had a significant effect on the drying process. The highest drying intensity and the lowest drying time were observed at the temperature of 70 $^{\circ}$C and a velocity of 2 m s^{-1}. Energy consumption had the maximum value at the temperature of 70 $^{\circ}$C and a velocity of 2 m s^{-1} and a minimum value at the temperature of 50 $^{\circ}$C and a velocity of 1 ms^{-1}. The amount of activation energy for the food waste mass at three velocities was equal to 10417.44 J mol^{-1}.

Keywords: Activation energy, Cabinet dryer, Energy consumption, Food waste drying, Moisture diffusivity

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد 12، شماره 4، زمستان 1401، ص 480-467

طراحی و ساخت یک خشک‌کن کابینتی برای خشک کردن ضایعات غذایی و ارزیابی سینتیک و مصرف انرژی آن

احمد خالواحمدی[1]، امید رضا روستاپور[2*]، علی محمد برقعی[3]

تاریخ دریافت: 1400/02/19
تاریخ پذیرش: 1400/05/17

چکیده

ارائه راه‌کارهای جدید برای بهبود فرایند و کاهش زمان خشک شدن و همچنین توسعه خشک کردن در مهار زباله‌های تر یکی از مسائل مهم در حفظ سلامت جامعه است. خشک کردن می‌تواند از طریق کاهش رطوبت، ذخیره‌سازی برای آینده، حمل و نقل آسان، بهبود ارزش‌های گرمایی و وابستگی کمتر به سوخت‌های فسیلی، کاهش بوی زباله، کاهش ضایعات و کاهش اثرات زیست‌محیطی را به دنبال داشته باشد. در این راستا جهت مطالعه رفتار خشک شدن ضایعات غذایی یک نمونه خشک‌کن کابینتی طراحی، ساخته و ارزیابی شد. توان حرارتی معادل 2/7 kW به‌عنوان منبع گرمایش هوای ورودی تعیین شد. در این راستا طبق محاسبات انجام شده از یک فن گریز از مرکز با حجم هوای $310\ m^3 h^{-1}$، 2800 rpm و 110 pa برای ایجاد جریان هوا در خشک‌کن استفاده شد. سینی خشک‌کن دارای مجاری هواگذر میانی و جانبی بود. تاثیر سه سطح دمای ۵۰،۶۰ و $70^{\circ}C$ و سه سطح سرعت جریان هوای ورودی 1، 1/5 و $2\ m\ s^{-1}$ بر مدت زمان، شدت خشک شدن و میزان مصرف انرژی خشک کردن ضایعات غذایی با ضخامت 3cm مورد بررسی قرار گرفت و نمودارهای نسبت رطوبت و شدت خشک شدن استخراج شد. نتایج نشان داد تمام فرایند خشک شدن در دوره نزولی رخ داده است. مصرف انرژی در دمای $70\ ^{\circ}C$ بیشترین و در دمای $50\ ^{\circ}C$ کمترین مقدار است. مقدار انرژی فعال‌سازی برای توده ضایعات غذایی در سه سطح سرعت، مقدار ثابت $10417/44\ J\ mol^{-1}$ به‌دست آمد. ضریب نفوذ رطوبت در دماهای 50 و $60\ ^{\circ}C$ کمتر از دمای $70\ ^{\circ}C$ بوده است زیرا با افزایش دما مقاومت سلولی کاهش یافته و نفوذ رطوبت افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: انرژی فعال‌سازی، انرژی مصرفی، خشک کردن پسماندهای غذایی، خشک‌کن کابینتی، ضایعات غذایی، ضریب نفوذ رطوبت

مقدمه

امروزه یکی از مهم‌ترین اولویت‌های کشورهای جهان در حوزه زیست‌محیطی، بازیافت زباله است. مواد آلی قابل تجزیه، به‌طور عمده زباله‌های تولیدشده در آشپزخانه‌ها توسط خانوارها در سراسر جهان است. تشویق مردم برای جدا کردن و خشک کردن زباله‌های آلی پروژه نویدبخش برای مدیریت پسماندهای خانگی آلی ارگانیک است تا به‌طور معنی‌داری از حجم آن‌ها کاسته شود. اهداف پروژه خشک کردن زباله، طراحی و توسعه خشک‌کن خانگی نوآورانه، انعطاف‌پذیر، جمع و جور و مناسب برای خشک شدن زباله به‌منظور کاهش حجم آن‌ها و جلوگیری از انتشار آن در هوا، آب و خاک است. به‌طور کلی، زباله‌های زیستی خشک یک منبع کربن ثابت است که می‌تواند برای تولید انرژی سبز نیز استفاده شود. محققان استفاده از خشک‌کن خورشیدی را برای خشک کردن ضایعات غذایی برای استفاده به‌عنوان خوراک دام مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که میزان خشک شدن در خشک‌کن‌های خورشیدی به شدت وابسته به مقدار محصولات است و مقدار خشک شدن می‌تواند بر این اساس تغییر کند. همچنین خشک‌کن خورشیدی برای مزارع مناسب است و می‌تواند در مزارع حیوانی کوچک و متوسط با اولویت پرورش طیور مورد استفاده قرار گیرد (Nijmeh, Ragab, Emish, & Jubran, 1998). رفتار خشک کردن ضایعات غذایی با ترکیبی از برگ‌های کلم و کاهو در دمای بین 50 تا $150^{\circ}C$ در یک خشک‌کن جریان متقاطع

1- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اقلید، اقلید، ایران
2- موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
3- گروه مهندسی بیوسیستم، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: o.roostapour@areo.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2021.69918.1037

با ضخامت 1 تا 2cm مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا منحنی‌های خشک شدن استخراج شد. نتایج نشان داد که شدت خشک کردن در دمای $150^{\circ}C$ تا 7 مرتبه بیشتر از دمای $50^{\circ}C$ است و در رطوبت بالا نسبت خشک شدن نیز بیشتر می‌باشد (López, Iguaz, Esnoz, & Vírseda, 2000). محققان دیگر یک خشک‌کن با بازیافت گرمای زباله را طراحی کردند؛ در این خشک‌کن رطوبت و هوای خروجی زباله‌ها از خشک‌کن به منبع حرارتی فرستاده می‌شد. نتایج نشان داد که هوا از طریق تماس با زباله نساجی آلوده، به محیط منتقل می‌شود و هوای خروجی سیستم زباله خشک‌کن شامل گرد و غبار و مواد شیمیایی آلوده در طی خشک کردن نمی‌توانند دوباره استفاده شود (Ogulata, 2004). در مطالعه‌ای، بهبود طراحی خشک‌کن کابینتی، کاهش کل زمان خشک شدن، بهینه‌سازی با هزینه کم، تولید محصول مناسب و با کیفیت، مورد نظر قرار گرفت. اجزای مختلف موجود خشک‌کن شامل یک کابینت بود که سینی‌های حاوی دانه در آن قرار داشت. گرما از طریق یک منبع حرارتی تامین و هوای گرم با کمک فن گریز از مرکز به محفظه خشک‌کن منتقل می‌شد. آن‌ها افت فشار استاتیک را در کانال‌ها با استفاده از معادله دارسی و دیاگرام مودی محاسبه کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که استفاده از فن گریز از مرکز هزینه کمتری دارد و باعث توزیع یکنواخت گرما بر روی تمام دانه‌ها و تامین مقدار مناسب هوای مورد نیاز در محفظه خشک‌کن می‌شود و همچنین باعث خشک شدن سریع‌تر دانه‌ها می‌شود (Adzimah & Seckley, 2009). به‌منظور ارزیابی و امکان‌سنجی خشک شدن آفتابی زباله، یک خشک‌کن آفتابی در مقیاس کوچک طراحی و ساخته شد. خشک‌کن دارای یک پوشش شیشه‌ای و از چوب با وزن کم و مقاومت مکانیکی بالا و قسمت‌های داخلی و خارجی با ورق‌های فولادی گالوانیزه سیاه و با عایق داخلی پشم شیشه پوشیده شده بود. عملکرد خشک‌کن به این صورت بود که بخشی از پرتوهای خورشیدی از پوشش شیشه‌ای عبور کرده و به جاذب که برای افزایش جذب اشعه خورشیدی به رنگ مشکی مات نقاشی شده بود می‌رسید. راندمان حرارتی خشک‌کن 9/4% تا 28/2% متغیر بود. در آزمایش‌های خشک کردن، راندمان خشک کردن از 2/4% تا 3/5% متغیر بود. نتایج نشان داد که سطح اشعه خورشیدی بالاتر باعث افزایش درجه حرارت بالاتر و افزایش روند خشک شدن می‌شود (Ferreira, Gonçalves, & Miai, 2013). در تحقیقی یک خشک‌کن زباله طراحی شد که با تزریق جریان هوای گرم از پایین باعث ایجاد گردابه شده و قادر بود که زباله‌ها را خشک کند. سه نوع ورودی هوای گرم در پایین خشک‌کن درنظر گرفته شد و با استفاده از روش CFD، الگوی گردابه‌های جریان مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که گردابه هوای گرم تحت تاثیر تعداد ورودی‌ها قرار نمی‌گیرد (Kim, Kang, & Jeong, 2014). یک خشک‌کن بستر سیال برای خشک کردن زیست‌توده طراحی شد. مواد اولیه زیست‌توده در این خشک‌کن چوب اره از درخت صنوبر با محتوای رطوبتی 60% و جرم حجمی $282 kg\ m^{-3}$ بود. نتایج حاصله نشان داد که نسبت خشک شدن زیست‌توده در خشک‌کن بستر سیال بالا است و برای تاثیر بیشتر نیاز به جداسازی ذرات بی اثر مانند شن و ماسه نیست (Liu *et al.*, 2014). تجزیه و تحلیل خشک کردن سه پسماند اصلی روغن زیتون (تفاله زیتون، فاضلاب آسیاب زیتون و لجن باقی‌مانده) مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا از یک خشک‌کن خورشیدی در سه حالت طبیعی، اجباری و استفاده از سیستم اضافی برای تأمین انرژی (نوع ترکیبی) استفاده شد. نتایج نشان داد که زمان خشک کردن در حالت ترکیبی کاهش قابل‌توجهی داشته است. افزایش دمای هوا و همچنین کاهش رطوبت نسبی آن باعث کاهش زمان خشک شدن، بین 20 تا 40٪ شد (Montero *et al.*, 2015). در تحقیق دیگری با استفاده از یک خشک‌کن خورشیدی محصولات کشاورزی نسبت به خشک کردن زباله‌های غذایی رستوران‌ها اقدام و خواص ترمودینامیکی سیال در نقاط ورودی و خروجی اندازه‌گیری شد. در این راستا انرژی مصرفی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که میزان خشک شدن به شدت تابش خورشید و مدت زمان تابش بستگی دارد (Ikem, Osim, Nyong, & Takim, 2016) دیگر محققان یک خشک‌کن نقاله‌ای خورشیدی را برای کاهش رطوبت مواد زیست‌توده طراحی کردند. سیستم طراحی شده در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شد و بهینه‌سازی اقتصادی توسط یک الگوریتم ژنتیک در برنامه‌های مختلف اقتصادی انجام گردید. خشک‌کن از یک جمع‌کننده خورشیدی با صفحه صاف، پنل‌های فتوولتائیک، یک فن، یک مبدل حرارتی با سوخت کمکی، محفظه خشک کردن و جداکننده سیکلونی تشکیل شده بود. نتایج نشان داد که بسته به شرایط اقتصادی، خشک کردن زیست‌توده با خشک‌کن طراحی شده بین 4 تا 7 سنت در هر کیلوگرم زیست‌توده هزینه دارد و استفاده از انرژی خورشیدی یک روش مقرون به صرفه برای خشک کردن زیست‌توده در مقیاس بزرگ نیست (Shirinbakhsh & Amidpour, 2017). نحوه توزیع جریان هوای کنارگذر و میان‌گذر در مدل سه‌بعدی خشک‌کن با ظرفیت 30kg شلتوک را با استفاده از روش CFD شبیه‌سازی کردند. در الگوی کنارگذر، هوا از دیواره‌های جانبی مخزن و در میان‌گذر، از کانال وسط مخزن به میان توده وارد می‌شد. شبیه‌سازی نشان داد که هوا از مجراهای میان‌گذر و کنارگذر با سرعت بیشتری جریان می‌یابد. عدم وجود کانال میانی در الگوی کنارگذر منجر به تولید دمایی نامنظم با اعوجاج زیاد می‌شود (Roustapour, Azimi, & Gazor, 2019). با توجه به این‌که توزیع هوا بر نحوه خشک کردن و در نتیجه کاهش زمان فرآیند و میزان مصرف انرژی تأثیر می‌گذارد، در

این تحقیق یک خشک‌کن کابینتی با سینی دارای مجاری هواگذر میانی و جانبی برای خشک کردن ضایعات غذایی طراحی و ساخته شد و تاثیر دما و سرعت جریان هوای ورودی بر مدت زمان و نسبت خشک شدن ضایعات غذایی و میزان مصرف انرژی مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

طراحی و ساخت خشک‌کن کابینتی

در طراحی خشک‌کن کابینتی موارد ذیل مد نظر قرار گرفت: 1- قابلیت تغییر و تنظیم دقیق فاکتورهای آزمایش مانند سرعت و دمای هوای ورودی و تعویض صفحات توزیع‌کننده، 2- جلوگیری از اتلاف حرارت و سهولت کارکردن. خشک‌کن مورد نظر شامل محفظه خشک کردن، گرم‌کن برقی، فن، کانال ورودی هوا، صفحات توزیع هوا، حسگر دمای هوا، سینی توری با مجاری هواگذر میانی و جانبی و تابلو برق کنترل است. قسمت‌های مختلف محفظه هوای گرم از ورق گالوانیزه، دو جداره با ضخامت 2cm با عایق پشم شیشه ساخته شد. در طراحی خشک‌کن، میزان رطوبت تبخیر شده با توجه به ابعاد سینی $(0/57\times0/4\times0/05)m^3$ و برای حداکثر ضخامت 5 cm و تعیین ظرفیت 10kg در هر وعده و رسیدن تا رطوبت 10٪ (بر پایه تر) با استفاده از روابط (1) و (2) محاسبه گردید (Ehime, 2008; Adzimah & Seckley, 2009). رطوبت اولیه و جرم حجمی ضایعات غذایی از میان مطالعات انجام شده بالاترین مقدار به‌ترتیب 82٪ (بر پایه تر) و $892kgm^{-3}$ در نظر گرفته شد (Shin & Youn, 2005).

$$M=\rho v \quad (1)$$

$$M_R=M\left(\frac{X1-X2}{1-X2}\right) \quad (2)$$

که در آن v حجم سینی (m^3)، ρ جرم حجمی ضایعات غذایی $(892kgm^{-3})$، M ظرفیت خشک‌کن در هر وعده (kg)، M_R مقدار رطوبت ضایعات غذایی که باید خشک شود (kg)، X_1 رطوبت اولیه مواد 82٪ و X_2 مقدار رطوبت نهایی مطلوب برای خشک کردن (10٪) هست.

انرژی حرارتی مورد نیاز

انرژی حرارتی لازم جهت تبخیر آب ضایعات غذایی از رابطه (3)، و مقدار توان حرارتی از رابطه (4) به‌دست آمد (Ehime, 2008; Adzimah & Seckley, 2009)

$$Q_{heat} = MC_p\Delta T + M_RH_{fg} \quad (3)$$

$$P_{heater} = \frac{Q_{heat}}{time(s)} \quad (4)$$

اگر دمای ورودی خشک‌کن حداکثر 80°C باشد 25% صرف خشک کردن شود و دمای محیط 20°C باشد اختلاف دما حدود 40°C خواهد بود. ΔT اختلاف دمای بین خشک‌کن و محیط (40°C)، Q_{heat} مقدار حرارت مورد نیاز جهت خشک کردن (J)، P_{heater} توان حرارتی مورد نیاز (w)، H_{fg} گرمای ویژه تبخیر $(kJ\ kg^{-1})$ می‌باشد. ظرفیت گرمای ویژه (C_p) اکثر مواد جامد کمتر از آب $(kJ\ kg^{-1}\,^{\circ}C^{-1})$ 4/1813 می‌باشد. به دلیل ماهیت ناهمگن ضایعات غذایی، تنوع زیادی در خصوصیات حرارتی آن وجود دارد لذا برای به‌دست آوردن ظرفیت گرمای ویژه ضایعات غذایی، از رابطه (5) استفاده شد (Singh & Heldman, 2009).

$$C_p=0.837+3.349x_w \quad (5)$$

x_w محتوی رطوبت مواد می‌باشد که برای ظرفیت گرمای ویژه ضایعات غذایی با رطوبت (82٪)، مقدار $3/583\ kJ\ kg^{-1}\,^{\circ}C^{-1}$ محاسبه شد و بر این اساس، مقدار توان گرم‌کن برقی 1/9 kW به‌دست آمد. به‌منظور افزایش کارایی دستگاه خشک‌کن در تامین هوای لازم در دماهای بالاتر از 80°C، از 5 المنت میله‌ای با مجموع توان 2/7 kW به‌عنوان منبع حرارتی هوای ورودی استفاده شد.

حجم هوا

بر اساس رابطه موازنه انرژی، مقدار حرارتی که گرم‌کن تولید می‌نماید با مقدار حرارتی که هوا کسب می‌کند، برابر می‌باشد. لذا با محاسبه توان هیتر از رابطه (4) و موازنه قرار دادن با رابطه (6)، دبی جرمی هوا، و در نهایت از رابطه (7) حجم هوا محاسبه گردید (Adzimah & Seckley, 2009; Lewis, 1990).

$$Q_{air} = \dot{m}_{air} C_P \Delta T \quad (6)$$

$$v= \frac{\dot{m}_{air}}{\rho} \quad (7)$$

Q_{air} مقدار حرارتی که هوا کسب کرده است، $\dot{m}_{air}$ دبی جرمی هوا $(kg\ s^{-1})$، Cp ظرفیت گرمایی ویژه هوا $(kJ\ kg^{-1}\,^{\circ}C^{-1})$، v میزان هوای مورد نیاز (m^3s^{-1})، ρ جرم حجمی هوا (kgm^{-3}) می‌باشد. اگر ضریب طراحی 1/5 در نظر گرفته شود حجم هوای مورد نیاز $0/071(m^3s^{-1})$ یا $256\ (m^3h^{-1})$ خواهد بود.

انتخاب فن

برای این‌که فرآیند خشک شدن به‌طور موثر اتفاق بیفتد، به جریان هوای کافی نیاز است. این امر مستلزم استفاده از یک فن مناسب می‌باشد که بر فشار استاتیک ایجاد شده در کابینت خشک‌کن غلبه کرده و همچنین جریان هوا را با سرعت مناسب تامین کند. افت فشار ناشی از مسیر جریان برابر مجموع افت فشار در مسیر مستقیم، افت فشار ناشی از تغییر سطح مقطع و افت فشار ناشی از مقاومت ضایعات غذایی است. افت فشار ناشی از اصطکاک بخش اول بر اساس ضریب اصطکاک و عدد رینولدز و رابطه دارسی از رابطه (8) و افت فشار بخش دوم بر اساس رابطه (9) تعیین شد (Adzimah & Seckley, 2009).

$$\Delta H_f = \lambda L U^2/2gh \tag{8}$$

$$\Delta H_C = \frac{U^2}{2g}\left(1-\frac{A1}{A2}\right)^2 \tag{9}$$

U سرعت هوا در محفظه طبق معادله مومنتوم تعیین می‌شود (ms^{-1})، h ضخامت لایه مواد در سینی (m)، L طول محفظه (m)، ΔH_f افت فشار در مسیر مستقیم (pa)، λ ضریب اصطکاک، A2 سطح مقطع محفظه خشک‌کن (m^2) و A1 نیز سطح مقطع محفظه بخاری (m2) است. ضریب اصطکاک بر حسب زبری نسبی و عدد رینولدز جریان و با استفاده از جریان مودی در بخش‌های مختلف مسیر جریان بین محدوده 0/023 و 0/035 تعیین شد. افت فشار ناشی از بستر، با استفاده از رابطه (10) محاسبه شد (Amiri Chayan, Khoshtaghaza, & Kianmehr, 2004) ε ضریب تخلخل از رابطه (11) تعیین شد (Lewis, 1990).

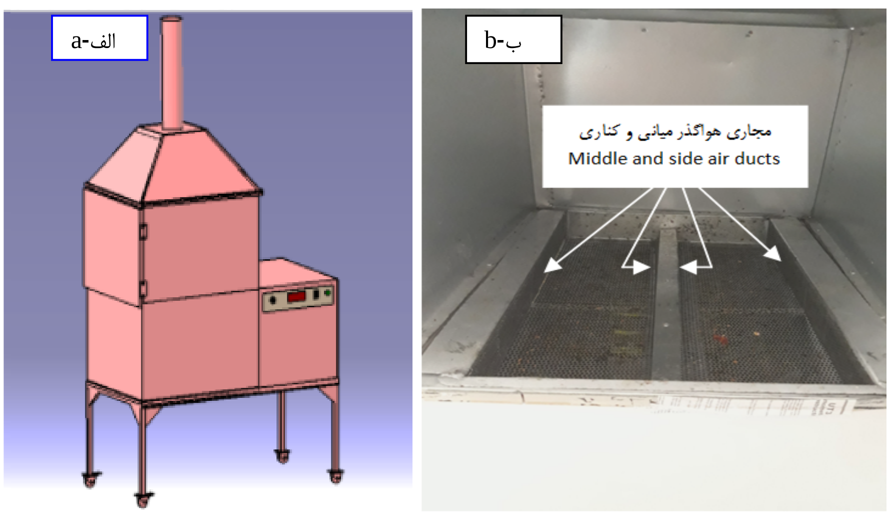
$$\Delta p_{bed}=g(1-\varepsilon)(\rho_p - \rho_f)h \tag{10}$$

$$\varepsilon=\left(1-\frac{\rho_f}{\rho_p}\right) \times 100 \tag{11}$$

در روابط بالا، ρ_p جرم حجمی توده ضایعات غذایی و ρ_f جرم حجمی مواد خشک است. افت فشار کل از مجموع افت فشار ناشی از مسیر عبور هوا و افت فشار بستر 70pa محاسبه شد. که با محاسبه ضریب طراحی 1/5 مقدار pa 105 تعیین می‌شود. برای اطمینان از توزیع مناسب هوا به محفظه خشک‌کن و مصرف انرژی کمتر، از یک فن گریز از مرکز با حجم هوای $310 m^3\ h^{-1}$، 2800rpm و 110pa استفاده شد.

طراحی نرم‌افزاری

پس از محاسبات لازم، به طراحی نرم‌افزاری پرداخته شد. در اینجا از نرم‌افزار Catia 2019 استفاده شد و قسمت‌های مختلف خشک‌کن طراحی و ساخته شد. شکل 1 طرحواره خشک‌کن و سینی با مجاری هواگذر میانی و جانبی را نشان می‌دهد.



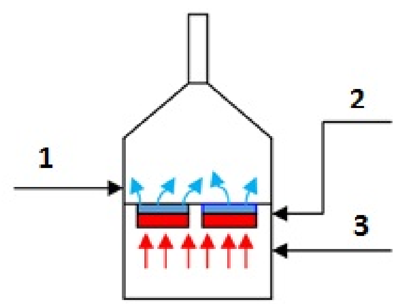
شکل 1- الف: طرحواره خشک‌کن، ب: سینی خشک‌کن

Fig. 1. a: Schematic of the dryer, b: Tray of dryer

آزمون و ارزیابی

مواد زائد مورد استفاده از پسماندهای میوه و سبزیجات، غذاهای خانگی و مغازه‌های میوه‌فروشی فراهم گردید. مواد غیر خوراکی مثل شیشه، کاغذ، پلاستیک و فلزات از زباله‌ها جدا شده و بقیه با دستگاه خردکن صنعتی مدل kaspian 909 (ساخت ایران) به قطعات کوچک‌تر از 20mm تبدیل شدند. ابتدا محصول مورد نظر یک ساعت در محیط قرار داده شد تا با محیط هم دما شود و سپس برای از بین بردن بخشی از آب، با یک پرس فشاری دستی فشرده شدند. با توجه به تاثیر کاهش ضخامت لایه محصول بر روی کاهش مدت زمان خشک شدن و میزان مصرف انرژی دستگاه، ضخامت 3cm برای خشک کردن ضایعات غذایی انتخاب شد (Gazor, Minaee, & Rostami, 2005). ضایعات غذایی با لایه‌ای به ضخامت 3cm روی سینی خشک‌کن ریخته شدند و سپس مقدار 47gr از ضایعات غذایی در داخل ظرف‌های توری مکعبی با ابعاد سطح مقطع $(5\times5)\ cm^2$ ریخته و در سه جای سینی حاوی ضایعات غذایی جاسازی شدند. سپس با برقراری جریان هوای گرم در محفظه، فرایند خشک کردن انجام شد. روش خشک کردن به این صورت بود که هوای گرم به زیر سینی محتوی توده ضایعات و اطراف سینی برخورد کرده و هوای گرم

توسط کانالی از وسط سینی و همچنین از کناره‌های سینی عبور می‌کرد و باعث خشک شدن محتویات سینی می‌شد (Roustapour et al., 2019) (شکل 2). فرایند خشک کردن در سه سطح دمای 50، 60 و $70^{\circ}C$ و سه سطح سرعت جریان هوای ورودی 1، 1/5 و $2 ms^{-1}$ در سه تکرار انجام شد و منحنی‌های سینتیک آن‌ها استخراج گردید. تجزیه و تحلیل آماری با بررسی اثرات 3 دما و 3 سرعت هوا در 3 تکرار با استفاده از آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی انجام شد آزمون مقایسه با استفاده از آزمون LSD و با نرم‌افزار spss26 انجام گرفت.



شکل 2- روش خشک شدن ضایعات غذایی در خشک‌کن (1- تبخیر، 2- سینی محصول، 3- منبع حرارت)

Fig. 2. Drying procedure of waste food in dryer (1. Vaporization, 2. Tray, 3. Heater)

در طی فرآیند، ظرف نمونه‌ها هر 30 دقیقه یکبار توزین شدند. این فرایند تا زمان رسیدن وزن محصول به مقدار ثابت ادامه داشت (Gazor *et al.*, 2005). برای اندازه‌گیری سرعت جریان هوا از یک سرعت‌سنج پروانه‌ای مدل UNIT UT363 (ساخت چین) استفاده شد. دما به‌وسیله ترموکوبل از نوع G-sense تولید ایران اندازه‌گیری و کنترل می‌شد که در قسمت پایین‌تر از سینی ضایعات غذایی نصب شده بود.

سینتیک خشک شدن

برای تعیین مدت زمان خشک شدن به‌دست آوردن نمودارهای سینتیک خشک شدن ضروری است. برای به‌دست آوردن نسبت رطوبت MR از رابطه (12) استفاده شد. در موادی که دارای رطوبت زیاد هستند رابطه نسبت رطوبت به رابطه (13) ساده می‌شود (Ertekin & Yaldiz, 2004). رطوبت مواد طی خشک‌شدن بر پایه خشک به‌وسیله رابطه (14) محاسبه شد (Tun & Juchelkova, 2019). نموداری که از رسم آهنگ خشک شدن در مقابل درصد رطوبت بر پایه وزن خشک به‌دست می‌آید منحنی شدت خشک شدن نامیده می‌شود؛ تعیین شدت خشک شدن از رابطه (15) به‌دست آمد (Roustapour, Maftoonazad, & Khaloahmadi, 2014).

$$MR=\frac{M_d - M_e}{M_o - M_e} \quad (12)$$

$$MR=\frac{M_d}{M_o} \quad (13)$$

$$X_{d.b.} = \frac{w_w - w_d}{w_d} \quad (14)$$

$$N=\frac{-M_d}{A}\frac{dx}{dt} \quad (15)$$

که در آن $X_{d.b}$ رطوبت بر پایه خشک، M_d رطوبت در لحظه جاری بر پایه خشک و M_o رطوبت اولیه محصول ($kg_{water}\ kg_{drymatter}^{-1}$) می‌باشند و W_d وزن خشک (kg)، W_w وزن در طی خشک کردن (kg)، dt زمان متوالی بین دو توزین (h)، dx رطوبت متوالی بین دو زمان توزین، A سطح تبخیر (m^2)، N آهنگ شدت خشک شدن ($kg\ m^{-2}\ h^{-1}$) می‌باشد.

تعیین انرژی مصرفی

میزان انرژی مصرفی در هر فاز خشک کردن از رابطه (16) محاسبه شد (Motevali, Abbaszadeh, Minaei, Khoshtaghaza, & Ghobadian, 2012).

$$E_t= A\ \upsilon\ \rho_a\ C_a\ \Delta T\ Dt \quad (16)$$

E_t انرژی مصرفی در هر آزمایش (kW.h)، A سطح مقطع، ρ_a چگالی هوا ($kg\ m^{-3}$)، ΔT اختلاف دمای خشک‌کن و محیط ($^{\circ}C$)، Dt زمان کل خشک شدن برای هر فاز (h)، C_a ظرفیت حرارتی هوا ($kJ\ kg^{-1}{}^{\circ}C^{-1}$) می‌باشد.

تعیین ضریب نفوذ موثر رطوبت و انرژی فعال‌سازی

ضریب نفوذ موثر با استفاده از قانون دوم پخش فیک و با در نظر گرفتن ضخامت لایه توده مورد نظر به‌صورت باریکه نامحدود و برای زمان‌های طولانی خشک شدن، از رابطه (17) محاسبه شد (Ghasemkhani, Rafiei, Kayhani, & Dalvand, 2018).

$$MR=\frac{8}{\pi^2}\exp(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}) \quad (17)$$

$$K_0=(\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}) \quad (18)$$

که در آن L، نصف ضخامت لایه (m)، D_{eff}، ضریب نفوذ موثر رطوبت ($m^2 s^{-1}$)، MR نسبت رطوبت می‌باشد. انرژی فعال‌سازی با استفاده از رابطه (19) محاسبه شد.

$$D=D_0 .\exp(E_a/RT) \quad (19)$$

معادله بالا، شکلی خطی به‌صورت y=mx+b دارد. اگر از دو طرف رابطه بالا، لگاریتم طبیعی بگیریم، به رابطه (20) خواهیم رسید. ضریب K_1 طبق رابطه (21) محاسبه می‌شود.

$$LnD=lnD_0 - E_a/RT \quad (20)$$

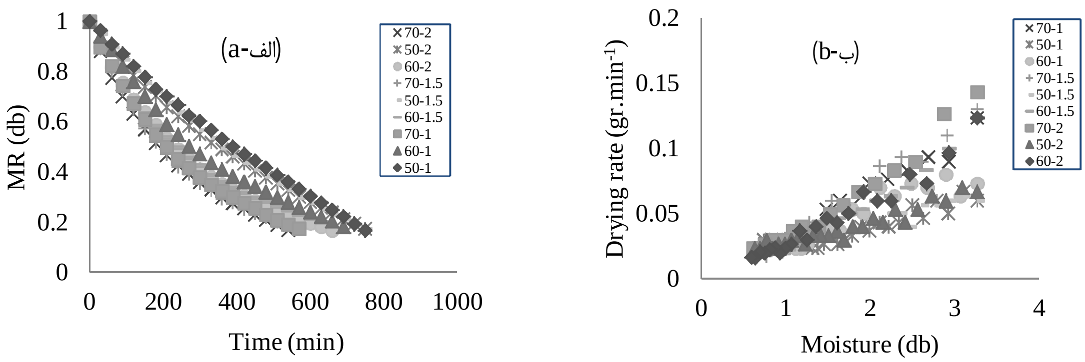
$$K_1=E_a/R \quad (21)$$

که Ea انرژی فعال‌سازی ($kJ\ mol^{-1}$)، R ثابت جهانی گازها ($kJmol^{-1}\ k^{-1}$)، D_0 ثابت ضریب نفوذ (m^2s^{-1})، T دمای مطلق هوا (K) می‌باشد. در فرایند خشک کردن انرژی فعال‌سازی به کمترین انرژی مورد نیاز برای شروع تبخیر رطوبت از محصول و ادامه فرایند اطلاق می‌شود و یک مولفه بسیار مهم برای تخمین حداقل شرایط خشک کردن برای به‌دست آوردن نوع ماده دلخواه خشک شده می‌باشد (Ghasemkhani *et al*., 2018). متغیرهای دما و سرعت در هر آزمایش به‌صورت جداگانه جمع‌آوری و ثبت شدند.

نتایج و بحث

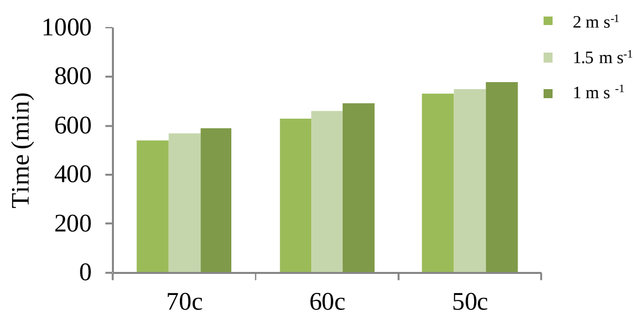
بررسی سینتیک خشک شدن

محتوی رطوبت ضایعات غذایی طی خشک‌شدن به نسبت رطوبت تبدیل شد. نمودارهای آهنگ خشک شدن و نسبت رطوبت استخراج گردید (شکل-3). نمودارهای نسبت رطوبت در شکل (3-الف) نشان می‌دهند که دما و سرعت هوا تاثیر به‌سزایی بر تغییرات محتوای رطوبتی محصول داشته است. چنان‌که با افزایش دما و سرعت مدت زمان خشک شدن کاهش یافته است (شکل 4). افزایش دما موجب شد که سرعت خروج رطوبت از توده‌ها افزایش یافته و منحنی‌های به‌دست آمده از تغییرات رطوبت محصول در واحد زمان دارای شیب بیشتر باشد. در دماهای 70، 60 و 50°C با سرعت‌های 2، 1/5و $1ms^{-1}$ به‌ترتیب کم‌ترین زمان خشک شدن و بیشترین شیب را دارند. کاهش زمان خشک شدن با افزایش دما برای بسیاری از مواد غذایی مانند برگ گزنه (Alibas, 2007)، تفاله گوجه‌فرنگی (Al-Harahsheh, AL-Muhtaseb, & Magee, 2009)، پیاز (ArslanOzcan, 2010)، هویج (Rostami Baroji, Seiiedlou Heris, & Dehghannya, 2017)، انار (Mazandarani, Aghajani, Daraei Garmakhany, Bani Ardalan, & Nouri, 2017)، ضایعات کاهو و کلم (López *et al*., 2000) به‌دست‌آمده است. با توجه به نمودارهای شدت خشک شدن شکل (3-ب)، آهنگ خشک شدن با افزایش دمای هوای خشک‌کن بیشتر گردیده است. در ناحیه اول خلل و فرج پر از آب است و سطح ماده به‌وسیله مایع کاملا مرطوب است گرما صرف رسانیدن دمای محصول به دمای نهان تبخیر شده است.



شکل 3- الف: تغییرات نسبت رطوبت، ب: شدت خشک شدن

Fig. 3. a: Chenges of moisture rate, b: Drying rate



شکل 4- مدت زمان خشک شدن

Fig. 4. Drying time

سپس تبخیرحرکت خود را به سمت مرکز جسم دنبال کرده است، بعد از آن، مرحله نهایی خشک شدن شروع شده است. در دمای 70°C و سرعت $2\ ms^{-1}$ آهنگ نزولی از شیب بیشتری برخوردار است. تمام فرایند خشک شدن برای هر سه نمونه در دوره نزولی رخ داده است که نشان‌دهنده مقاومت درونی در خروج رطوبت از ضایعات غذایی می‌باشد. در دوره نزولی خشک شدن، دما، مهم‌ترین عامل فیزیکی است که بر روی خشک کردن تاثیر می‌گذارد. چنین نتیجه‌ای توسط محققان دیگر در مورد خشک شدن محصولات کشاورزی مانند نعناع (Ayadi, Mabrouk, Zouari, & Ahmed, 2014) و زرشک (Chaji, Ghasem zadeh, & Ranjbar, 2008) به‌دست آمده است.

آنالیز آماری

جدول 1 نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس خشک شدن را در سطح 1٪ نشان می‌دهد. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که فاکتورهای دما و برهمکنش سرعت و دما در سطح 1٪ معنی‌دار و فاکتور سرعت جابه‌جایی هوا هم در سطح 1٪ معنی‌دار بودند. اما با توجه به جدول 2 و مشاهده نتایج مقایسه میانگین‌ها به روش LSD نشان داد که فاکتور دما بین دماهای 60 و 70°C معنی‌دار نشده است ولی بین دماهای 50 و 60°C و همچنین بین 50 و 70°C معنی‌دار شده است و فاکتور سرعت جابه‌جایی هوا هم بین سرعت‌های 1 و $1/5\ ms^{-1}$ و همچنین بین 1/5 و $2\ ms^{-1}$ معنی‌دار نشده است اما بین سرعت‌های 1 و $2\ ms^{-1}$ معنی‌دار شده است که می‌تواند به این دلیل باشد که اختلاف سرعت $0/5\ ms^{-1}$ تاثیر به‌سزایی در روند خشک کردن نداشته است اما افزایش اختلاف سرعت جابه‌جایی هوا به $1\ ms^{-1}$ در خشک کردن موثر بوده است. هوای گرم پس از برخورد به زیر سینی محتوی توده ضایعات غذایی، توسط کانالی از میان و کنار توده عبور می‌کند و باعث خشک شدن محتویات سینی می‌شود در این روش پس از خشک شدن و کاهش حجم مواد و باز شدن منافذ کانال میانی و کناری سینی منجر به کاهش حجم هوا در پشت سینی مواد می‌شود و هوا سریع‌تر به سمت بالای سینی حرکت کند که باعث کاهش شار حرارتی در میان توده و خلل و فرج توده می‌شود. در نتیجه نفوذ هوای گرم به مواد متخلخل با شدت کمتری رخ می‌دهد. در این روش ابتدا موادی که به دیوارهای سینی نزدیکترند زودتر خشک شده و کاهش حجم بیشتری نسبت به بقیه مواد دارند. در نتیجه وجود مجاری هواگذر میانی و جانبی باعث عبور سریع هوا و کاهش فشار در پشت سینی ضایعات غذایی می‌شود و این با نتایج محققان دیگر مطابقت دارد. روستاپور و همکاران (Roustapour *et al.*, 2019) دو الگوی ورودی هوای میان‌گذر و کنارگذر را با استفاده از روش CFD شبیه‌سازی کرده بودند. در الگوی میانی هوای گرم از منافذ توری وسط محفظه به سمت بالا حرکت کرده و در داخل توده شلتوک از جداره‌های اطراف منتشر می‌شد و در الگوی کنارگذر جریان هوا از دو کانال تعبیه شده در طرفین خشک‌کن وارد محفظه می‌شد. بررسی تغییرات جریان در مخزن خشک‌کن با الگوی جریان میان گذر نشان داده بود که هوا پس از عبور از کانال ورودی به‌صورت یک هسته پر سرعت در زیر خشککن توسعه می‌یابد و جریان به محض ورود به سطح زیرین در گذر میانی توسعه می‌یابد. کانتور سرعت، در صفحات کناری با الگوی جریان کنارگذر تا حدود زیادی مشابه هم بود و بیشترین تمرکز خطوط دما در نزدیکی دیواره‌ها که جریان سیال در آن‌ها وجود داشت دیده می‌شد که حاکی از بیشتر بودن سرعت جریان هوا در آن نواحی بود.

جدول1- نتایج تجزیه واریانس تاثیر دما و سرعت هوا روی زمان خشک شدن ضایعات غذایی

Table 1- Results of variance the effect of temperature and speed on drying time of food waste

منابع تغییر **Source**	مجموع مربعات **Sum of Squares**	درجه آزادی **Degree of Freedom**	میانگین مربعات **Mean Squares**	**F**
سرعت Velocity	1.944	2	0.972	7.022^ns^
دما Temperature	24.186	2	12.093	87.378**
سرعت×دما Temperature× Velocity	3.611	4	0.903	6.523**
خطا Error	2.491	18	0.138	
تعداد کل Total	22480.546	27		

** اختلاف معنی‌دار در سطح 1%، ns عدم اختلاف معنی‌داری در سطح 1%

** Significant difference at probability level of 1%

ns Non significant difference at probability level of 1%

جدول 2- نتایج مقایسه میانگین‌های تجزیه واریانس به روش LSD

Table 2- Results of comparison means of analysis variance by LSD method

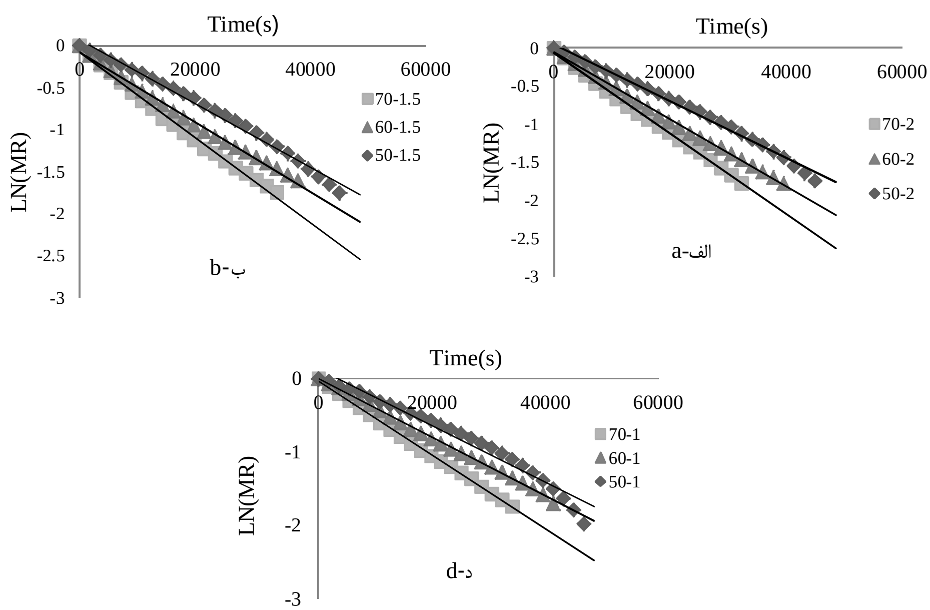
منابع تغییر Source	(I)	(J)	اختلاف میانگین Mean Difference (I-J)
سرعت Velocity	1.0	1.5	.318^{ns}
		2.0	.657**
	1.5	1.0	-.318^{ns}
		2.0	.339^{ns}
	2.0	1.0	-.657**
		1.5	-.339^{ns}
دما Temperature	50	60	1.980**
		70	2.034**
	60	50	-1.980**
		70	.054^{ns}
	70	50	-2.034**
		60	-.054^{ns}

** اختلاف معنی‌دار در سطح 1%، ns عدم اختلاف معنی‌داری در سطح 1%

** Significant difference at probability level of 1%

ns Non significant difference at probability level of 1%

آن‌ها با شبیه‌سازی تغییرات دما در دو الگو به این نتیجه رسیدند که سرعت بالای جریان در کانال‌های میان‌گذر نسبت به داخل توده و با وجود مقاومت فشاری توده محصول، انرژی، فرصت کافی برای نفوذ به توده متخلخل را نداشته است و در الگوی کنارگذر هم هیچ انتشار دمایی در محیط متخلخل مشاهده نکردند (Roustapour *et al.*, 2019). در این آزمایش هم اختلاف سرعت 0/5 ms^{-1} به علت مقاومت توده ضایعات تاثیر به‌سزایی در روند خشک کردن نداشت و نتایج تجربی این آزمایش با نتایج شبیه‌سازی مطابقت دارد.



شکل 5- نمودارهای LN(MR) نسبت به زمان

Fig. 5. Diagram of ln(MR) relative to time

تعیین ضریب نفوذ موثر رطوبت

جهت محاسبه ضریب نفوذ موثر رطوبت منحنی‌های Ln(MR) نسبت به زمان رسم شدند و رابطه‌های رگرسیونی خطی و ضریب شیب خطی آن‌ها تعیین گردید. شکل 5 نمودارهای Ln(MR) را در مقابل زمان نشان می‌دهد.

رابطه‌های رگرسیونی خطی شکل (5-الف) در سرعت 2 (ms^{-1}) در رابطه‌های ۲۲،۲۳ و 24 به‌ترتیب برای دماهای 50، 60 و 70°C با ضریب تبیین (R^2> 99%) به‌دست آمده است. نمودارهای Ln(MR) در دماهای 50 و 60°C دارای مقدار شیب خطی یکسان و کمتر از دمای 70°C می‌باشد.

$$Y= -4\times10^{-05}x + 0.0495 \quad (22)$$

$$Y= -4\times10^{-05}x - 0.0551 \quad (23)$$

$$Y = -5\times10^{-05}x - 0.0652 \quad (24)$$

همچنین رابطه‌های رگرسیونی خطی شکل (5-ب) در سرعت 1/5 (ms^{-1}) در رابطه‌های ۲۵،۲۶ و 27 که به‌ترتیب برای دماهای 50، 60 و 70°C با ضریب تبیین (R^2> 99%) به‌دست آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود نمودارهای Ln(MR) در دماهای 50 و 60°C دارای مقدار شیب خطی یکسان و کمتر از دمای 70°C می‌باشد.

$$Y = -4\times10^{-05}x + 0.0758 \quad (25)$$

$$Y = -4\times10^{-05}x - 0.0747 \quad (26)$$

$$Y = -5\times10^{-05}x - 0.0732 \quad (27)$$

رابطه‌های (28)، (29) و (30) رابطه‌های رگرسیونی خطی شکل (5-د) در سرعت 1 (ms^{-1}) به‌ترتیب برای دماهای 50، 60 و 70°C با ضریب تبیین (R^2> 99%) می‌باشد. رابطه‌ها در دماهای 50 و 60°C دارای شیب خطی یکسان و کمتر از دمای 70°C می‌باشد.

$$Y= -4\times10^{-05}x + 0.1279 \quad (28)$$

$$Y = -4\times10^{-05}x - 0.0032 \quad (29)$$

$$Y = -5\times10^{-05}x - 0.0342 \quad (30)$$

جدول 3 ضرایب نفوذ موثر رطوبت خشک شدن ضایعات غذایی را در سطوح مختلف دما وسرعت نشان می‌دهد مقادیر ضریب نفوذ موثر در دو دمای 50 و 60°C یکسان و کمتر از دمای 70°C می‌باشد. مقدار ضریب نفوذ موثر در دو دمای 50 و 60°C معادل 3/65×10^{-9}(m^2s^{-1}) و در دمای 70°C، (m^2s^{-1}) 4/56×10^{-9} می‌باشد. که دلیل این امر این است که در دمای 70°C مقاومت غشایی سلول در اثر درجه حرارت بالا تخریب شده و این لایه غشایی از بین رفته و رطوبت می‌تواند از قسمت داخلی مواد به سطح خارجی انتقال یافته و سرعت خروج آن افزایش یابد. این امر سبب افزایش ضریب انتقال جرم داخلی یا همان ضریب نفوذ در مواد می‌شود. لوپز و همکاران در سال 2000 ضریب نفوذ موثر رطوبت را برای ضایعات سبزیجات کلم و کاهو، برای ضخامت 1 تا 2 cm و در دماهای 50 تا 150°C در دستگاه خشک‌کن جریان متقاطع را در محدوده 6/03×10^{-9} تا 3/15×10^{-8} اعلام کرده بودند (Lopez *et al*., 2000).

جدول 3- ضرایب نفوذ رطوبت خشک شدن ضایعات غذایی در سطوح مختلف دما و سرعت

Table 3- Effective moisture coefficients of drying food waste at different levels of temperature and velocity

دما Temperature (°C)	سرعت Velocity (ms^{-1})	ضریب نفوذ موثر رطوبت Effective Moisture coefficients (m^2s^{-1})
50	2	3.65×10^{-09}
60	2	3.65×10^{-09}
70	2	4.56×10^{-09}
50	1.5	3.65×10^{-09}
60	1.5	3.65×10^{-09}
70	1.5	4.56×10^{-09}
50	1	3.65×10^{-09}
60	1	3.65×10^{-09}
70	1	4.56×10^{-09}

تعیین انرژی فعال‌سازی

انرژی فعال‌سازی با ترسیم (LN(Deff نسبت به 1/T به‌دست می‌آید. شکل6 نمودارهای LN(Deff) نسبت به 1/T را نشان می‌دهد. رابطه‌های رگرسیونی خطی در سرعت‌های 1، 1/5 و 2 (ms^{-1}) در رابطه‌های (31)، (32) و (33) به‌ترتیب برای دماهای 50، 60 و 70°C با ضریب تبیین (R^2= 0.7665) به‌دست آمد. رابطه‌ها در هر سه دما دارای مقدار شیب خطی یکسان می‌باشند. در جدول 4 مقادیر انرژی فعال‌سازی نشان می‌دهد که در سه سطح سرعت انرژی فعال‌سازی یکسان است. مقدار این انرژی برای توده ضایعات غذایی در سه سرعت مقدار ثابت 10417/44($J\ mol^{-1}$) به‌دست آمد که در محدوده انرژی فعال‌سازی ضایعات غذایی قرار دارد (Jo, Kim, Shin, Lee, & Yoo, 2017).

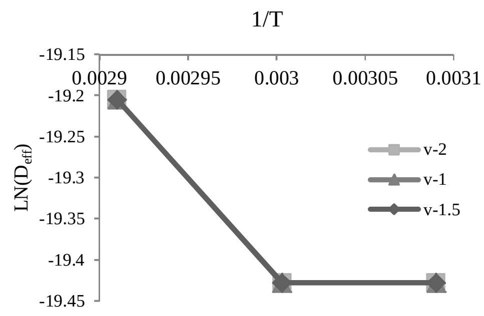
$$Y = -1253x - 15.594 \quad (31)$$

$$Y = -1253x - 15.594 \quad (32)$$

$$Y = -1253x - 15.594 \quad (33)$$

تعیین انرژی مصرفی

با توجه به شکل 7 میزان انـرژی مصـرفی در دمـای $70^{\circ}C$ و سرعت $2ms^{-1}$ متر بر ثانیه بیشترین مقدار را دارد و کمتـرین مقـدار مربوط به دمای $50^{\circ}C$ و سرعت $1ms^{-1}$ مـی‌باشـد. وجـود مجـاری هواگذر جانبی و میانی باعث شد تا هوای گـرم شـده از زیـر سـینی خشک‌کن خارج شده و به فضای بالایی توده حرکت کنـد و حجـم فضای بالای توده را هم گرم کند. گرم شدن فضای بـالای سـینی منجر به افزایش مصرف انرژی می‌شود که در دمای $70^{\circ}C$ بیشترین مصرف انرژی را دارد که با نتایج محققان در این زمینه مشابهت دارد (İsmail, Beyribey, & Doymaz, 2016; Motevali *et al.*, 2012).



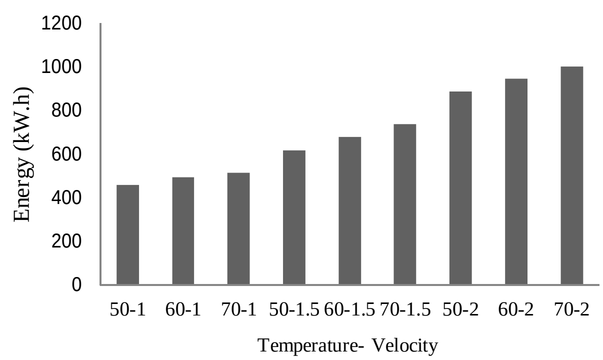
شکل 6- نمودارهای $LN(D_{eff})$ نسبت به 1/T

Fig. 6. Diagram of $\ln(D_{eff})$ relative to 1/T

جدول 4- مقدار انرژی فعال‌سازی خشک شدن

Table 4- Activation energy values of drying

سرعت Velocity (ms^{-1})	شیب منحنی K	انرژی فعال‌سازی Ea($Jmol^{-1}$)
2	1253	10417.44
1.5	1253	10417.44
1	1253	10417.44



شکل 7- میزان مصرف انرژی در سطوح مختلف دما و سرعت

Fig. 7**.** Energy consumption at different levels of air temperature and velocity

نتیجه‌گیری

دستگاه خشک‌کن ضایعات غذایی با موفقیت طراحـی، سـاخته و آزمایش شد. نتایج نشان دادند که با افزایش دما مدت زمـان خشـک شدن کاهش یافته و تمام فرایند شدت خشک شدن در مرحله نزولـی رخ داده اسـت. فاکتورهـای دمـا و بـرهمکنش سـرعت و دمـا تـاثیر

معنی‌داری در خشک کردن داشتند. بیشترین شدت خشک شدن و کمترین زمان خشک شدن مربوط به دمای 70°C و سرعت $2ms^{-1}$ می‌باشد. مصرف انرژی در دمای 50°C کمترین و در دمای 70°C بیشترین مقدار را دارد. مقادیر ضریب نفوذ موثر رطوبت در دو دمای 50 و 60°C معادل 3/65×10-9 m^2s^{-1} و در دمای 70°C مقدار 4/56×10-9 m^2s^{-1} تعیین گردید و میزان انرژی فعال‌سازی برای توده ضایعات غذایی در سه سرعت مقدار ثابت $10417/44Jmol^{-1}$ به‌دست آمد.

References

1. Adzimah, K. S., & Seckley, E. (2009). Improvement on the design of a cabinet grain dryer. *American Journal of Engineering and Applied Science, 2*, 217-228. https://doi.org/10.3844/ajeassp.2009.217.228
2. Al-Harahsheh, M., AL-Muhtaseb, A., & Magee, T. R. A. (2009). Microwave drying kinetics of tomato pomace: Effect of osmotic dehydration. *Chemical Engineering and Processing, 48*, 524-531. https://doi.org/10.1016/j.cep.2008.06.010
3. Alibas, I. (2007). Energy consumption and colour characteristics of nettle leaves during microwave, vacuum and convective drying. *Biosystems Engineering, 96*, 495-502. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.12.011
4. Amiri Chayan, R., Khoshtaghaza, M. H., & Kianmehr, M. H. (2004). Design principle of experimental fluidizid bed dryer for some agriculture products. *Journal of Agricultural Engineering Research, 5*, 36-52. (in Persian).
5. Arslan, D., & Ozcan, M. M. (2010). Study the effect of sun, oven and microwave drying on quality of onion slices. *LWT-Food Science and Technology, 43*, 1121-1128. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.02.019
6. Ayadi, M., Mabrouk, S. B., Zouari, I., & Ahmed, B. (2014). Kinetic Study of the Conective Drying of Spearmint. *Journal of Saudi Society of Agriculture Sciences*, 13(1), 1-7. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.04.004
7. Chaji, H., Ghasem zadeh, H., & Ranjbar, I. (2008). *Effect of Pre- treatments Using Ethyl oleate, Hot & Warm Water on Drying Characteristics of Barberry*. 5th National Congress of Agricultural Machinery Engineering and Mechanization. Mashad. Iran. (in Persian).
8. Ehiem, J. C. (2008). *Design and development of an indus-trial fruit and vegetable dryer*. Thesis report. University of Agriculture, Makurdi, Nigeria.
9. Ertekin, C., & Yaldiz, O. (2004). Drying of Eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering, 63*, 349-359. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.08.007
10. Ferreira, A. G., Gonçalves, L. M., & Miai, C. B. (2013). *Experimental analysis of industrial solid waste solar drying*. 22nd International Congress of Mechanical Engineering. Brazil.
11. Gazor, H. R., Minaee, S., & Rostami, M. A. (2005). Influence of temperature and thickness on pistachio drying in batch dryers. *Journal of Agricultural Sciences, 11*, 81-93. (in Persian).
12. Ghasemkhani, H., Rafiei, S., Kayhani, A., & Dalvand, M. B. (2018). Evaluation of drying apple slices using a rotary dryer equipped with a heat exchanger. *Journal of Agricultural Machinery Mechanical Research, 7*, 9-19. (in Persian).
13. Ikem, I. A., Osim, A. D., Nyong, O. E., & Takim, S. A. (2016). Determination of loading capacity of a direct solar boiler dryer. *International Journal of Engineering and Technology, 8*, 1386-1396.
14. İsmail, O., Beyribey, B., & Doymaz, I. (2016). Effect of drying methodes on drying characttrstic, Energy Consumption and Color of Nectarine. *Journal of Thermal Engineering Technical University Press, 2*, 801-806.
15. Jo, J. H., Kim, S. S., Shin, J. W., Lee.Y. E., & Yoo, Y. S. (2017). Pyrolysis characteristics and kinetics of food wastes. *Energies*. https://doi.org/10.3390/en10081191.
16. Kim, B. S., Kang, C. N., & Jeong, J. H. (2014). A study on a high efficiency dryer for food waste. *Journal of the Korean Society for Power System Engineering, 18*, 153-158. https://doi.org/10.9726/kspse.2014.18.6.153.
17. Lewis, M. J. (1990). *Physical Properties of Foods and Food Processing Systems*. Physical Properties of Foods and Food Processing Systems. Woodhead Publishing, U.K.
18. Liu, Y., Peng, J., Kansha, Y., Ishizuka, M., Tsutsumi, A., Jia, D., Bi, X. T., Lim, C. J., & Sokhansanj, S. (2014). Novel fluidized bed dryer for biomass drying. *Fuel Processing Technology, 122*, 170-175. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.01.036
19. López, G. A., Iguaz, A., Esnoz, A., & Vírseda, P. (2000). Thin-layer drying behavior of vegetable waste from wholesale market. *Drying Technology, 18*, 995-1006. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.01.036
20. Mazandarani, Z., Aghajani, N., Daraei Garmakhany, A., Bani Ardalan, M. J., & Nouri, M. (2017). Mathematical modeling of thin layer drying of pomegranate (*Punica granatum* L.) arils: Various drying methods. *Journal of Agricultural Science and Technology, 19*, 1527-1537.
21. Montero, I., Miranda, M. T., Sepulveda, F. J., Arranz, J. I., Rojas, C. V., & S. Nogales. (2015). Solar dryer application for olive oil mill wastes. *Energies, 8*(12), 14049-14063. https://doi.org/10.3390/en81212415
22. Motevali, A., Abbaszadeh, A., Minaei, M., Khoshtaghaza, M. H., & Ghobadian, B. (2012). Effective moisture diffusivity, activation energy and energy consumption in thin-layer drying of JuJube (*Zizyphus JuJube* Mill). *Journal of Agricultural Science and Technology, 14*, 523-532.

23. Nijmeh, M. N., Ragab, A. S., Emish, M. S., & Jubran, B. A. (1998). Design and testing of solar dryers for processing food wastes. *Applied Thermal Engineering*, *18*, 1337-1346. https://doi.org/10.1016/S1359-4311(98)00002-7
24. Ogulata, R. T. (2004). Utilization of waste-heat recovery in textile drying. *Applied Energy*, *79*, 41-49. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2003.12.002
25. Rostami Baroji, R., Seiiedlou Heris, S. S., & Dehghannya, J. (2017). Mathematical simulation of heat and mass transfer in convectional drying of carrot, pretreated by ultrasound and microwave. *Journal of Agricultural Machinery*, *7*, 97-113. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.v7i1.38881
26. Roustapour, O. R., Azimi, O., & Gazor, H. R. (2019). Computational fluid dynamics analysis in a corn air flow paddy dryer with two types of passing air flow of lateral and central patterns. *Journal of Biosystem Engineering*, *50*, 115-128. (in Persian).
27. Roustapour, O. R., Maftoonazad, N., & Khaloahmadi, A. (2014). Study of drying kinetics and shrinkage of potato slices in a parallel flow dryer. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, *12*, 109-122. (in Persian).
28. Shin, H. S., & Youn, J. H. (2005). Conversion of food waste into hydrogen by thermophilic acidogenesis. *Biodegradation*, *16*, 33-44. https://doi.org/10.1007/s10531-004-0377-9
29. Shirinbakhsh, M., & Amidpour, M. (2017). Design and optimization of solar- assisted conveyer-belt dryer for biomass. *Energy Equipment and Systems*, *5*, 10-15. (in Persian).
30. Singh, P. R., & Heldman, D. R. (2009). *Introduction to Food Engineering*. Elsevier, USA.
31. Tun, M. M., & Juchelkova, D. (2019). Drying methods for municipal solid waste quality improvement in the developed and developing countries: A review. *Environmental Engineering Research*, *24*(4), 529-542. https://doi.org/10.4491/eer.2018.327.